

Technologien für die Energiewende – eine systematische multikriterielle Analyse und Ableitung des F&E-Bedarfs

Peter Viebahn, Ole Zelt, Manfred Fischedick, Juri Horst, Martin Wietschel und Simon Hirzel

Im Herbst 2018 wird das neue Energieforschungsprogramm (EFP) der Bundesregierung verabschiedet. Das Forschungsprojekt „Technologien für die Energiewende“, kurz TF_Energiewende, hat hierfür eine wesentliche wissenschaftliche Basis geliefert. Für 31 Technologiefelder, die mehrere Hundert Technologien umfassen, analysierten die Projektpartner das Innovations- und Marktpotenzial, bewerteten Chancen und Risiken sowie den möglichen Beitrag der Technologien zur Umsetzung der Energiewende und zeigten Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf. Die nun veröffentlichten Ergebnisse dienen gleichzeitig als umfassendes Nachschlagewerk für Entscheider in Unternehmen, Forschungsabteilungen, Fördergeber und die interessierte Fachöffentlichkeit.

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) als Teil des strategischen Leitprojekts „Trends und Perspektiven der Energieforschung“ gefördert und federführend vom Wuppertal Institut zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und der IZES gGmbH – Institut für Zukunfts-Energie- und Stoffstromsysteme als Verbundpartnern sowie zehn weiteren renommierten wissenschaftlichen Instituten durchgeführt. Zentrale Ergebnisse des Projekts wurden Ende Juli 2018 an den parlamentarischen Staatssekretär Thomas Bareiß des BMWi überreicht (Abb. 1). Durch das strategische Leitprojekt wurde der öffentliche Konsultationsprozess wissenschaftlich begleitet, den das BMWi als federführendes Ministerium der Bundesregierung für die Erarbeitung des 7. EFP bis Ende Januar 2018 durchführte [1].

Kernaufgabe des Vorhabens TF_Energiewende war die Aktualisierung und systematische Neubewertung von Entwicklungsstatus und Perspektiven der verschiedenen Technologien, die einen potenziellen Beitrag zur Energiewende leisten können. Gegenüber früheren Analysen war bei der Bewertung neben der mittlerweile deutlich erhöhten Komplexität im Energiesystem auch eine Reihe an gesellschaftspolitischen Zielsetzungen zu berücksichtigen (z. B. Klima- und Ressourcenschutz, gesellschaftliche Akzeptanz, Exportpotenzial, Beschäftigungsimpulse). Zudem wurde eine transparente Entscheidungshilfe für anwendungsnahe Demonstrations- und Modellvorhaben entwickelt, die in der Regel nicht von der Forschungsförderung adressiert werden.

Abbildung in "et", 2018, Heft 9, verfügbar

Ziele der Technologiebewertung

Die ambitionierten Ziele der deutschen Energiewende können nur mit einem Mix aus unterschiedlichen Technologien erreicht werden. Gemäß der im Energiekonzept der Bundesregierung definierten Ziele sind hier solche Technologien von herausragender Bedeutung, die den Anteil erneuerbarer Energien fördern sowie einen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz leisten.

Eine Reihe der für die Zielerreichung erforderlichen Technologien sind heute bekannt, viele davon schon weitestgehend entwickelt

und marktreif oder können sich bei geeigneten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen auf dem Markt etablieren. Darüber hinaus bestehen aber zentrale Erfordernisse bei der Weiterentwicklung von Technologien, bei der Bereitstellung von komplementären, die Markteinführung respektive -durchdringung ermöglichenden Technologien (z. B. Netze und Speicher), sowie dem Schließen von Technologielücken.

Technologische Innovationen sind dabei ein Schlüssel für den Erfolg der Energiewende. Nachhaltige Energietechnologien zu erforschen und zur Marktreife zu entwickeln ist das Ziel der Energieforschung. Nur durch



Abb. 1 Übergabe zentraler Projektergebnisse aus TF_Energiewende an den parlamentarischen Staatssekretär des BMWi, Thomas Bareiß (dritter von rechts)
Foto: Susanne Eriksson/BMWi

beständige Forschung und Entwicklung von Technologien ist es möglich, kontinuierlich eine höhere Energieeffizienz im Energiesystem zu erreichen, erneuerbare Energien noch stärker zu nutzen, die Systemstabilität aufrechtzuerhalten und zugleich die Kosten zu senken. Um ein versorgungssicheres und langfristig tragendes System zu erhalten, stellt auch das Zusammenspiel der technologischen Innovationen unter Berücksichtigung soziotechnischer und sozioökono-

mischer Wechselwirkungen ein wichtiges Fundament für die Systemtransformation dar.

Energieforschung kann zudem einen wichtigen Beitrag dafür leisten, die Marktposition der deutschen Wirtschaft auf dem Weltmarkt zu festigen. Das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, das im Herbst 2018 in seiner 7. Auflage erscheinen soll, bildet hierfür den zentralen Rahmen.

Betrachtung eines umfassenden Technologieportfolios

Einen zentralen wissenschaftlichen Beitrag zur Entwicklung des neuen EFP leistet das Projekt TF_Energiewende mit einer auf Deutschland bezogenen Analyse, die für 31 Technologiefelder aus dem Energiesektor den Status Quo (2015/2016) sowie eine mögliche Entwicklung bis 2030 mit Ausblick auf 2050 berücksichtigt. Die in der Analyse betrachteten Technologiefelder wurden folgenden sieben Technologiebereichen zugeordnet:

■ **Erneuerbare Energien:** Bioenergie, Tiefengeothermie, Photovoltaik, solare Wärme und Kälte, solarthermische Kraftwerke, Windenergie mit Exkurs Meeresenergie und Umweltwärme;

■ **Konventionelle Kraftwerke:** Zentrale Großkraftwerke und dezentrale Kraftwerke (Brennstoffzellen sowie Motoren und Turbinen), CO₂-Abscheidung und -Lagerung (Carbon Capture and Storage, CCS) sowie CO₂-Nutzung;

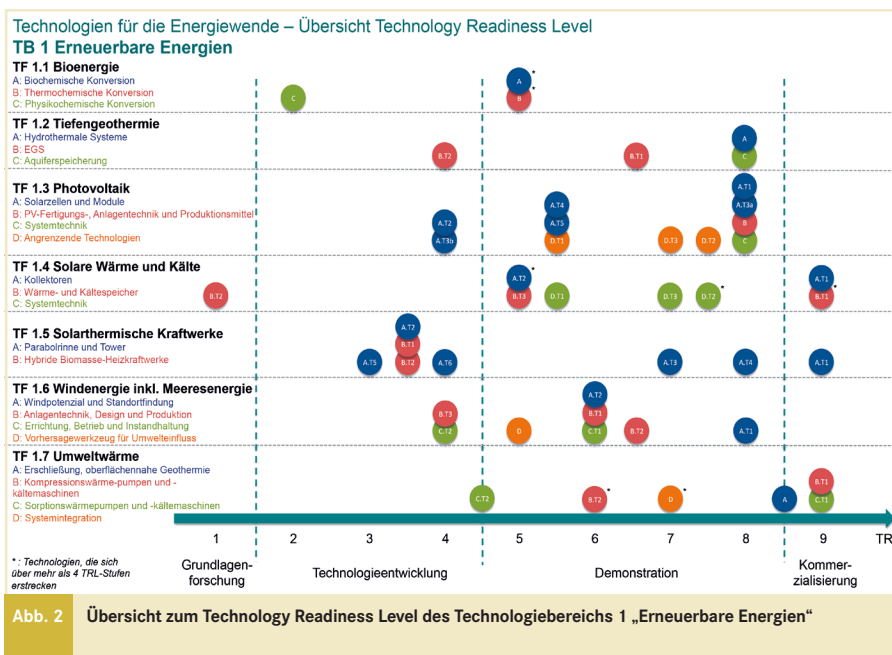
■ **Infrastruktur:** Stromtransport und -verteilung, Wärmetransport und -verteilung, Energiespeicher (elektrisch, elektrochemisch sowie thermisch, thermochemisch, mechanisch) sowie Nutzung von Erdgas- und Erdölinfrastrukturen und Raffinerien für strombasierte Brennstoffe;

■ **Sektorenkopplung:** Power-to-Gas (Wasserstoff, Methanisierung chemisch-katalytisch sowie biologische Methanisierung), Power-to-Liquids/Power-to-Chemicals und Verfahren der CO₂-Abtrennung aus Faulgasen und Umgebungsluft;

■ **Energie- und ressourceneffiziente Gebäude:** Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik;

■ **Energie- und Ressourceneffizienz in der Industrie:** Energieeffiziente Prozesstechnologien, energieeffiziente Querschnittstechnologien, Technologien zur Abwärmenutzung sowie Low-Carbon- und ressourceneffiziente Industrie;

■ **Integrative Aspekte:** Diese übergreifende Kategorie umfasst energiewirtschaftliche Auswirkungen der Elektromobilität bezogen auf Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie Hybrid-Oberleitungs-Lkw, Fragen der Digitalisierung, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Fragen der Systemintegration, -innovation und -transformation.



Für jedes Technologiefeld wurde ein umfassender „Technologiebericht“ erstellt, der zunächst die betrachteten Technologien und ihren Stand von Forschung & Entwicklung (F&E) beschreibt. Teil dieser Darstellung des Entwicklungsstandes war auch die Einschätzung des Technology Readiness Level (TRL) der verschiedenen Technologien auf einer Skala von 1 bis 9. Mithilfe von TRL-Übersichtsgrafiken können vereinfachende Rückschlüsse gezogen werden, ob die einzelnen Technologien eher der Grundlagenforschung zuzuordnen sind (TRL 1), Bedarf an klassischer Forschungsförderung aufweisen (ca. TRL 2 bis 6), eher Markteinführungsformate erfordern (ca. TRL 7 bis 8) oder bereits am Markt etabliert sind (TRL 9). Abb. 2 verdeutlicht das Prinzip der TRL-Grafiken am Beispiel des Forschungsbereichs 1 „Erneuerbare Energien“.

Aufbauend auf dem heutigen Entwicklungsstand der Technologiefelder beinhalten die Berichte des Weiteren eine umfassende multikriterielle Bewertung des Technologiefeldes und enden mit F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand. Dabei wird sowohl dargestellt, welche F&E-Erfolge durch die bisherige Forschungsförderung erzielt wurden, wo Fortschritte erreicht wurden, aber weiterer F&E-Bedarf besteht und wo sich neue F&E-

Themen ergeben haben. Ein separater Politikbericht enthält vierseitige Zusammenfassungen zu jedem Technologiebericht.

In einem internen Reviewverfahren wurden alle Technologieberichte vor Veröffentlichung von einer jeweils anderen Forschungseinrichtung des Konsortiums mit entsprechender Expertise qualitativ geprüft. Zusätzlich fanden Workshops mit Industrievertretern statt.

Kriterienraster als Bewertungsrahmen

Die Analyse der verschiedenen Technologien und die Ableitung des F&E-Bedarfs erfolgte auf der Basis einer multikriteriellen Bewertung. Das Forscherteam evaluierte jedes Technologiefeld anhand eines Kriterienrasters mit zwölf Bewertungskriterien (Abb. 3). Diese thematisieren den klima- und umweltpolitischen sowie energiewirtschaftlichen Beitrag der jeweiligen Technologien, betrachten die Positionierung deutscher Unternehmen im internationalen Kontext und bewerten die Systemkompatibilität. Hinzu kommen Aspekte der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie des Standes von F&E im internationalen Vergleich:

Relevanz öffentlicher Förderung

- **Kriterium 1: Vorlaufzeiten:** Bewertung der Länge der Vorlaufzeiten, d. h. der Dauer bis zur Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage für ein Technologiefeld;
- **Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig):** Zunächst Einordnung des Entwicklungsstadiums des Technologiefeldes. Anschließend werden technische und wirtschaftliche F&E-Risiken sowie Rohstoffrisiken bewertet.

Gruppe I: Klimapolitik & Energiewirtschaft

- **Kriterium 3: Marktpotenziale:** Abschätzung der künftigen Nachfrage nach einem Technologiefeld (ggf. auch einer einzelnen Technologie) weltweit;
- **Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen:** Berechnung der THG-Einsparungen und gegebenenfalls weiterer wichtiger Emissionseinsparungen von Erzeugungs- und Effizienztechnologien gegenüber Referenztechnologie (möglichst inkl. Vorkettenemissionen);
- **Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz:** Berechnungen der Primärenergie-Einsparungen gegenüber Referenztechnologie und gegebenenfalls weiterer wichtiger Ressourceneffizienzbeiträge;
- **Kriterium 6: Kosteneffizienz:** Kosten im Vergleich zu einer Referenztechnologie (einerseits systemanalytische Kosten, andererseits – optional – externe Kosten).

Gruppe II: Positionierung deutscher Unternehmen

- **Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung:** Ableitung der inländischen Wertschöpfung aus den Marktpotenzialen in Kriterium 3, basierend auf Studien oder Experteneinschätzungen;
- **Kriterium 8: Stand und Trends von Forschung und Entwicklung im internationalen Vergleich:** Qualitative Einschätzung der internationalen Aufstellung der deutschen Industrie und quantitative Analyse der F&E-Budgets sowie des F&E-Outputs in Deutschland.

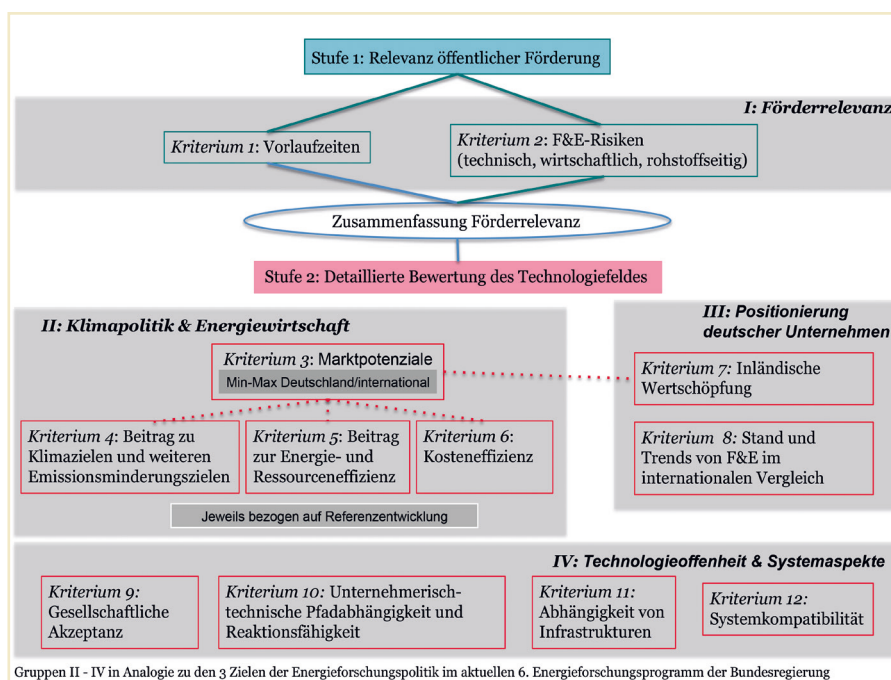


Abb. 3 Kriterienraster zur Bewertung der Technologiefelder

Gruppe III: Technologieoffenheit & Systemaspekte

■ **Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz:** Darstellung der öffentlichen Akzeptanz eines Technologiefeldes bzw. einer Technologie auf lokaler Ebene sowie übergeordnet in Wirtschaft und Gesellschaft;

■ **Kriterium 10: Unternehmerische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit** Analyse von Planungszeiten, Nutzungsdauern und Investitionshöhe, um abzuschätzen, inwieweit durch den Einsatz der Technologie Strukturen in der Energieversorgung kurz-, mittel- oder langfristig festgelegt werden.

■ **Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen:** Einschätzung, ob die Nutzung der Technologien unabhängig von bestehenden Infrastrukturen möglich ist, ob bestehende Infrastrukturen genutzt und ggfs. ausgebaut werden müssen oder ob die Errichtung neuer Infrastrukturen notwendig wird. Dies dient der Abschätzung der Flexibilität von Technologien bei ihrem Einsatz in Energieversorgungssystemen.

■ **Kriterium 12: Systemkompatibilität:** Bewertung der Kompatibilität einer Technologieanwendung zu (näher abzugrenzenden) übergeordneten oder untergeordneten Systemen. Als Maß für die Kompatibilität gelten die Teilkriterien Rückwirkungen, Anpassungsbedarf und Wechselwirkungen.

Mithilfe des systematischen, kriterienbasierten Vorgehens konnte das Forscherteam gewährleisten, dass eine Entscheidung über die Förderung von F&E-Vorhaben im Einklang mit übergeordneten (energie-)politischen Zielsetzungen erfolgen kann. Eine Priorisierung erfolgte in dem Vorhaben jedoch nicht, sondern ist Aufgabe der Ministerien bei der Erstellung des neuen EFP.

Orientierung an Energieszenarien

Die Bewertung zukünftiger Trends und Perspektiven erfolgte entlang unterschiedlicher (bestehender) sektorübergreifender Ziel-szenarien. Dies betrifft z. B. die Ableitung von Marktpotenzialen, die Kostenentwicklung entlang von Lernkurven oder die Abschätzung der vermiedenen Treibhausgase im Zeitablauf. Die Szenarien beschreiben mögliche langfristige Entwicklungen des Energiesystems sowohl für Deutschland als

auch international, die im Einklang mit weltweit anerkannten Klimareduktionszielen, aber auch künftigen Exportmöglichkeiten stehen. Die ausgewählten Szenarien bilden die Grundlage für die Bewertung in allen Technologiefeldern, wurden aber, wo für die Vertiefung oder aufgrund unzureichender Daten notwendig, durch weitere technologie-spezifische Szenarien ergänzt.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Anteile der Technologien in den verschiedenen Szenarien wurde jedoch kein einzelnes Szenario vorgegeben, sondern für jedes ausgewiesene Technologiefeld wurden Bandbreiten (Minimum bis Maximum) über alle analysierten Szenarien dargestellt. Hierbei wurde zwischen zwei verschiedenen Klimaschutz-Am-bitionsniveaus unterschieden.

Mittels einer sog. Innovationslückenanalyse wurden die aus den Szenarien abgeleiteten langfristigen Bedarfe der einzelnen Technologien mit dem Stand der heute verfügbaren bzw. in Entwicklung befindlichen Technologien abgeglichen. Es wurde ermittelt, wo ein ausreichender Abdeckungsgrad zu erwarten und an welcher Stelle vermutlich Lücken bestehen, die perspektivisch durch die Entwicklung geeigneter Technologien gefüllt werden können.

Transparente Entscheidungshilfe für marktnahe Vorhaben

Ergänzend zur Technologiebewertung hat sich das Konsortium auch mit der Frage beschäftigt, unter welchen Voraussetzungen über die Förderung reiner F&E-Projekte hinaus eine öffentliche Unterstützung zu erwägen ist. Der Förderung solcher marktnahe Projekte kommt vor dem Hintergrund der energie- und klimapolitischen Zielsetzungen eine besondere Bedeutung zu, um neu entwickelte Techniken und Konzepte erfolgreich und frühzeitig in den Markt zu bringen. Staatliche Interventionen können einerseits die Erforschung bestimmter technologischer Entwicklungen überhaupt erst ermöglichen, und andererseits können sie die Überwindung von Entwicklungsschwierigkeiten begünstigen. Dem staatlichen Engagement kann ein hohes Maß an Effektivität zugeschrieben werden, wenn bestehende Lücken zwischen Innovation und Marktanwendung geschlossen werden und

sich dadurch Multiplikatoreffekte ergeben, etwa durch eine Öffnung oder starke Positionierung in einem Zukunftsmarkt. Im Rahmen einer möglichen Förderung marktnahe Forschungsvorhaben sind jedoch eine Vielzahl von Herausforderungen zu beachten, u. a. ihr typischerweise hoher Mittelbedarf, aus dem wiederum der Bedarf nach möglichst objektiven, transparenten und nachvollziehbaren Entscheidungen bei der Bewertung der Projekte folgt oder die Abhängigkeit vom Markt-umfeld.

Vor diesem Hintergrund entwickelte das Konsortium eine für Entscheider handhabbare multikriterielle Methode, die helfen soll, transparente Entscheidungen über die Förderung vielversprechender Demonstrations- und Modellvorhaben in der anwendungsnahen Forschung zu treffen. Damit erhalten Fördermittelgeber eine orientierende Hilfestellung für Einzelfallentscheidungen, die in diesem Kontext oft die Regel sind. Auch für Antragsteller bietet sie eine Grundlage zur vorherigen Einschätzung ihres Förderantrags.

Beteiligte Forschungseinrichtungen

Neben den drei Verbundpartnern Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI und IZES wurde das Projekt von folgenden Unterauftragnehmern unterstützt, die jeweils einzelne der Technologiefelder bewertet haben:

- DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
- DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
- FZJ – Forschungszentrum Jülich GmbH
- GFZ – Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungs-Zentrum
- HZB – Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH
- ISE – Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- ISFH – Institut für Solarenergieforschung Hameln gGmbH
- IWES – Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
- ZAE – Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.
- ZSW – Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Umfangreiche Dokumentation veröffentlicht

Nach Abschluss des Projekts sind die folgenden Publikationen erschienen, die auf der Projektwebsite <https://wupperinst.org/tf-energiewende> herunter geladen werden können. Sie sind ebenso auf der Website <http://www.energieforschung.de/> erhältlich, auf der der Projektträger Jülich eine Vielzahl von Informationen zur Entwicklung der Energieforschung in Deutschland und zum Konsultationsprozess anbietet:

- Wuppertal Report 12 „Kriterienraster“: Darstellung der zur Technologiebewertung herangezogenen Methodik;
- Wuppertal Report 13.1 „Technologiebericht – Band 1“: Ausführliche Bewertung der Technologiebereiche Erneuerbare Energien, konventionelle Kraftwerke und Infrastruktur;
- Wuppertal Report 13.2 „Technologiebericht – Band 2“: Ausführliche Bewertung der

Technologiebereiche Sektorkopplung, Energie- und Ressourceneffizienz in Gebäuden sowie in der Industrie und integrative Aspekte;

- Wuppertal Report 14 „Politikbericht“: Zusammenfassung der Technologieberichte einschließlich einer Kurzdarstellung der Bewertungsmethodik;
- Technologieberichte der einzelnen Technologiefelder zum separaten Download;
- Teilbericht 3: Ergebnisse der Innovationslückenanalyse;
- Teilbericht 4: Entscheidungsunterstützung für die staatliche Förderung anwendungsnaher Forschungsvorhaben. Teil A: Anforderungen, Teil B: Leitfaden.

Anmerkung

[1] Neben TF.Energiewende beinhaltet das strategische Leitprojekt des BMWi auch das Forschungsprojekt „Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende“, kurz EnFo-2030,

unter der Leitung der TU München, siehe <https://www.ewk.ei.tum.de/en/forschung/projekte/enfo-2030/>

Dr. P. Viebahn, stellv. Abteilungsleiter, Dipl.-Umweltwiss. O. Zelt, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abteilung Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen, Prof. Dr. M. Fischedick, Vizepräsident, Wuppertal; Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal; M.Sc. Wirtschafts-Ing. J. Horst, Leiter Arbeitsfeld Energiemärkte, IZES gGmbH – Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme, Saarbrücken; Prof. Dr. M. Wietschel, Leitung Geschäftsfeld Energiewirtschaft, Dr. S. Hirzel, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe
peter.viebahn@wupperinst.org
ole.zelt@wupperinst.org